

Early 1990 gave Dr. Helmut Hoelzer a talk at the "Museum für Verkehr und Technik" in Berlin (now known as: Deutsches Technikmuseum Berlin)

This contribution to the History of Technology is based on his talk and on an article which appeared in: Annals of the History of Computing, Volume 7, Number 3, July 1985 (pp. 227 - 240), written by James E. Tomayko.

## **Helmut Hoelzer's Fully Electronic Analog Computer used in the German V2 (A4) rockets**

*Synopsis: A fully electronic general-purpose analog computer was designed by Helmut Hoelzer, a German electrical engineer and remote-controlled guidance specialist. He and an assistant built the device in 1941 in Peenemunde, Germany, where they were working as part of Werner von Braun's long-range rocket development team. The computer was based on an electronic integrator and differentiator conceived by Hoelzer in 1935 and first applied to the guidance system of the A-4 rocket (Goebbels, the Nazi propaganda minister dubbed, V 2, AOB). This computer is significant in the history not only of analog computation but also of the formulation of simulation techniques. It contributed to a system for rocket development that resulted in vehicles capable of reaching the moon.*

We will follow the main line of Hoelzer's German language talk held in Berlin, with some additional information from Tomayko's English language paper of 1985.

Drawings are derived from Helmut Hoelzer's dissertation (1946, at TH Darmstadt, AOB).

### **50 Jahre Analog Computer**

*Bis vor gar nicht langer Zeit haben sich nur sehr wenige Laute darum gekümmert wie diese elektronischen Analog Computer zustande kamen. Sie waren Nebenprodukte und standen völlig im Schatten viel größerer Vorhaben bis einmal das Interesse an ihnen geweckt wurde. Es war alles so ähnlich wie zur Zeit von Kolumbus (Columbus, AOB). Ein bekannter amerikanischer Wissenschaftler hat einmal gesagt: "Kolumbus wollte die Beziehung zu China verbessern. ein Problem, welches bis heute noch nicht gelöst ist. Aber sehen Sie sich doch mal die Nebenprodukte an ....!" So ähnlich erging es auch den elektronischen Analog Computern.*

*Dies änderte sich vor einigen Jahren. Damals erschien im George C. Marshall Space Flight Center der der Nasa in Huntsville, Alabama, U.S.A., ein Professor der Wichita State Universität, im State Kansas der U.S.A., mit dem Namen Dr. James Tomayko. Er hatte den Auftrag doch einmal herauszufinden, wie Nasa bisher Computer benutzt hatte, was für welche, warum, wie viele, wofür und warum nicht, und ob sie auch nicht zu teuer gewesen waren. Man hätte ja vielleicht U\$ 5,00 sparen können. Dr. Tomoyko wurde von einigen Leuten in den Labors herumgeführt und es wurden ihm verschiedene Gruppen von Computern gezeigt, die für verschiedene Raumfahrtprojekte verwendet wurden: für Projekt Mercury, Gemini, Apollo (das war das Mondlandeobjekt), u.s.w.*

*"Und was ist das da in der Ecke?"*

*"Ach - das ist ein Analog Computer der 1945 in Deutschland erbeutet wurde. Er wurde nach hier gebracht und wurde hier erst von der Army, dann von uns noch etwa 10 Jahre verwendet. "Aber das doch gar nicht sein, denn zu der Zeit gab es noch kein Computer!"*

*"Bitte sehr, hier steht er, oder besser sein Überbleibsel."*

*Daraufhin setzte sich Tomayko in Bewegung und besuchte alle Leute, die etwas darüber wissen konnten. Er landete schließlich auch bei mir. Er hat dann, was er herausfand, in "The Annals of the History of Computing" veröffentlicht, wo es dann Herr Dr. Biener von der Humboldt Universität las. Nun fing Dr. Biener an zu forschen und setzte sich dann mit mir in Verbindung.*

Wir sprechen von *Echtzeit Elektronischen Analog Computern*. Was heißt *Echtzeit*? Um dies klar zu machen, nehmen wir einmal an, wir wollten ein Regelsystem bauen, welches irgend einen Wert auf eine bestimmte Größe regulieren soll. Wir drücken zunächst einmal alles in mathematischen Gleichungen aus, und solange alles linear bleibt, können wir sie meistens auch lösen, aber jetzt sind da Nichtlinearitäten drin und Reibung, wo keine sein soll, und mechanische Lose u.s.w. und dann ist es nicht mehr möglich eine geschlossene Lösung zu finden. Deshalb ersetzen wir die mathematischen Ausdrücke wie ein Integral durch einen Integrator, einen Differentialquotient durch einen Differentiator, eine Multiplikation durch einen wie auf Deutsch heißt "Multiplier" u.s.w..

Nun haben wir also ein Gerät, welches uns die Lösung dieser Gleichung liefern kann. Aber dieses konnte man ja schon lange. Vannevar Busch baute ein solches Gerät in 1923, Udo Knorr, ich glaube, in 1914 etwas ähnliches in München. Nun passiert aber: Hier kommt der Chef und sagt: "Herr Müller, warum verwenden sie nicht unseren alten, zuverlässigen Servomotor in Ihrem Aufbau; Sie können so eine Menge Geld sparen." Wenn Herr Müller nun den Servomotor selbst, statt seiner nachgemachten Mathematik in sein Gerät einbauen will, damit dieser seinen Anteil an dem Gleichungssystem sozusagen selbst löst, muß alles im Zeitmaßstab des Servomotors arbeiten. Dies konnten die bisher bekannten Geräte nicht. Sie waren mechanische Geräte, und wenn z.B. Gestänge und Massen bewegt werden müssen von denen nichts in der Gleichung steht, wird das Ergebnis eben falsch. Es ist aber schon früher über diese elektronischen Echtzeit Analog Computer von denen ich hier sprechen will berichtetet worden, z.B. von den Professor Walther und Kirschstein von der Technischen Universität Darmstadt, von Professor Giloi von der Technischen Universität Berlin, in Dr. Hartmut Petzold's Dissertation über Rechnende Maschinen, in dem Buch "Weltraumfahrt" von Ernst A. Steinhoff, von Hosenthien und Boehm in dem Buch "From Peenemünde to Outer Space," in der Time-Life Serie "Understanding Computer," von mir selbst in einem Vortrag vor der American Astronomical Society und in meiner Dissertation in 1946. Darauf werden wir noch zurückkommen.

Zu der damaligen Zeit, vor 50 Jahren, war nicht jeder von meinem Erfolg für den Computer überzeugt. Die Mathematiker jener Zeit waren der Meinung, daß Mathematik nicht aus Stangen besteht und, nachdem der erste elektronische Analog Computer gebaut war, sagten sie "aus Draht besteht die Mathematik auch nicht." Und das sagten Leute, die z.B. nicht lineare Differentialgleichungen gar nicht lösen konnten. Nun will ich berichten, wie sich das alles ergab.

Im Jahre 1935 war ich Student in Darmstadt. Ich war auch Segelflieger. Ich habe es im Segelflug nie zu etwas ordentlichem gebracht, aber mir fiel auf, daß es in der ganzen Fliegerei nicht ein einziges Gerät gab, welches die absolute Geschwindigkeit eines Flugzeuges, d.h. die Geschwindigkeit gegenüber der Erde messen kann. Aha, dachte ich, das ist ja ganz einfach, man nimmt die Beschleunigung, die man ja messen kann, integriert sie und "voila!" hier ist die Geschwindigkeit. Voll Begeisterung über diese Idee rannte ich zu Professor Busch und offenbarte ihm, daß dies doch ein gutes Thema für die Studienarbeit wäre, die ich sowieso an seinem Institut machen mußte. Er sagte dann: "Dies ist aber Messtechnik - wir hier sind das Fernmelde-Technische Institut. Gehen Sie mal zu Kollegen Hueter." Bei Professor Hueter wurde ich von seinem Hauptassistenten, Dr. Debus, empfangen. Dr. Debus war der Mann, der nach dem Krieg in Amerika das Kennedy Space Center, also den Mondflughafen, aufgebaute und dessen erster Direktor wurde. Er hörte sich alles geduldig an und sagte: "Damit müssen wir zu Professor Hueter selbst gehen." Professor

Hueter sagte: "Wie wollen Sie denn die verschiedenen Sorten Beschleunigung auseinander halten? Da gibt es die Erdbeschleunigung und die Vorwärtbeschleunigung und eine Mixtur von beiden." Ich sagte, das müßte man eben studieren - worauf er sagte: "Das ist aber Dynamik - Kollege Blaess." Ich ging dann nie zu "Kollegen Blaess". Das Problem des Integrators wurde gar nicht für voll genommen. Wahrscheinlich wäre ich damit zu Professor Walther, Praktische Mathematik geschickt worden. Aber der dortige Hauptassistent hatte keine besondere Meinung von mir. So blieb es dann vom heutigen Standpunkt aus gesehen, mehr oder weniger bei einer Spielerei und einer theoretischen Untersuchung über die Nachahmung von mathematischen Operationen durch elektrische Netzwerke. Mit ernsthafter Arbeit mußte ich warten bis 1939 als ich bei Telefunken in Berlin arbeitete, am Anfang des Krieges dienstverpflichtet und nach Peenemünde geschickt wurde, wo die deutsche Armee unter der technische Leitung von Werner von Braun Raketenversuche machte. Man wollte das Verbot von weitreichenden Geschützen, welches aus dem Versailler Vertrag stammte, mit gesteuerten Fernraketen umgehen. Es ist an sich bedauerlich, daß, wie immer in der Menschgeschichte, so auch hier, zuerst eine Waffe gebaut werden mußte, bevor, wie in unserem Beispiel, Raketen als Raumfahrzeuge dienen konnten, mit denen man schließlich auf den Mond gelandet ist. Als Steuerung dieser Raketen war eine Kreisel-Kurssteuerung geplant. Aber eine Kurssteuerung ist gegenüber manchen Einflüssen, z.B. von Seitenwind machtlos und man plante deshalb eine dieser Steuerung überlagerte Funk-Fernsteuerung.



Photo 1: Shown here is the final version of Hoelzer's analog computer called: Mischgerät. It consists of 5 modules (two in front and 3 mounted on the other side of the central chassis).

*Dies sollte meine Aufgabe sein. Ich möchte hier aber nicht weiter auf diese Fernsteuerungsentwicklung eingehen, mit der Ausnahme zu sagen, daß sie zunächst einmal instabil war. Instabilität liegt dann vor, wenn eine Störung nicht abklinkt, sondern immer weiter aufschaukelt. Die Stabilitätstheorie verlangte, daß außer der seitlichen Abweichung*

auch die seitliche Komponente der Geschwindigkeit verwendet wird. Falls permanenter Seitenwind besteht, müßte dann auch noch das Integral der Abweichung aufgeschaltet werden. Woher kriegt man nun einen Echtzeit Integrator und einen Echtzeit Differentiator? Die Analog Computer Technologie war eben noch nicht da. Für einen Fernmeldeingenieur gab es da nun eine Lösung und zwar für beide Anforderungen: Den Kondensator. Aber das war nicht ganz problemlos. der Kondensator und die zugehörige Schaltungen haben Verluste; außerdem muß man verstärken können und Gleichstrom Verstärker haben bekanntlich Mücken. Nun, das Verstärkerproblem wurde so gelöst, daß einfach ein Wechselstromverstärker verwendet wurde. Der Meßwert war der Wechselspannung aufmoduliert mit unterdrücktem Träger (500 Hz, AOB). Diese Anordnung war Nullpunkt sicher und arbeitete gut. Zur Modulation wurde ein Ringmodulator verwendet, dessen Halbleiter aus Kupferoxydul bestanden und die sich als ebenfalls gut Nullpunkt sicher und stabil erwiesen. Die Phasentreue Gleichrichtung verwendete ebenfalls Ringmodulatoren in einer Phasenbrücke. Nun zu den Verlusten im Kondensator: Was bei dem Kondensator und in der Schaltung an Meßwert-Amplitude verloren ging, wurde durch positive Rückkopplung am Eingang wieder eingespeist. Die Rückkopplung machte das ganze zwar instabil, aber mit der Frequenz Null, wie das für einen guten Integrator ja auch der Fall sein muß. Die Leute im Labor sagen dazu: "Er läuft weg." Der Differentiator arbeitete ähnlich, auch mit positiver Rückkopplung. Die Verwendung einer Wechselspannung ermöglichte auch auf leichte Weise zu addieren oder subtrahieren, indem man die Sekundärseiten kleiner Transformatoren zusammenschaltete. Die Diagramme, die ich Ihnen hier zeige, sind nun schon 50 Jahre alt. Verstärkt wurde mit Elektronenröhren, denn Transistoren gab es noch nicht. Wenn Ihnen das heute alles etwas trivial vorkommt, bitte vergessen sie nicht, daß es sich um das Jahr 1940/41 handelt.

Abb. 1

"Integrator" mit Rückkopplung und Modulatorverstärker

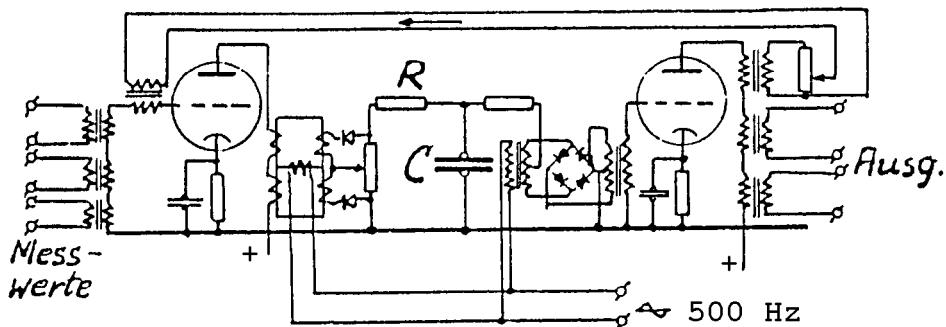


Abb. 2

"Differentiator" mit Rückkopplung und Modulatorverstärker.

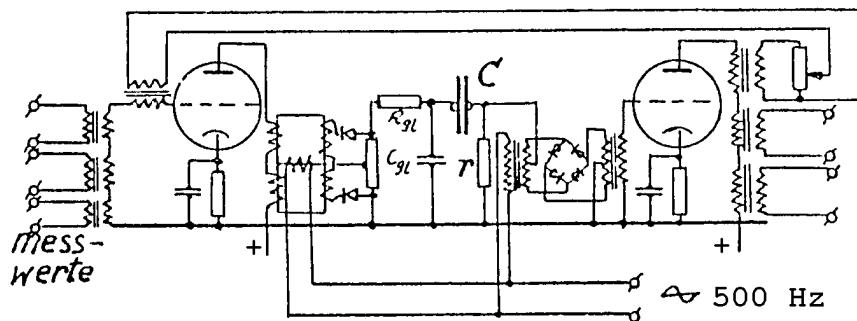


Abb. 1 &amp; 2

Abb. 2a

Zur theoretischen Behandlung des Differenzierators.

$$k=0; V \text{ beliebig} : u_2 = Vr(u_1 - r(u_2) \text{ mit } V \gg 1 \text{ u. } r \ll 1.$$

$$V=1, k \text{ " } : u_2 = r(u_1 + rC(k-1)u_2$$

$$= r(u_1 \text{ bei } k=1)$$

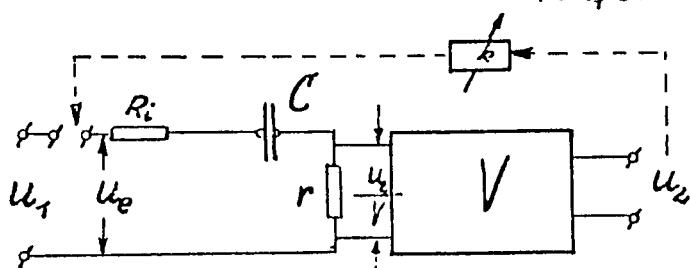


Abb. 2b

Zur theoretischen Behandlung des Integrators.

$$k=0; V \text{ beliebig} : u_2 = \frac{V}{RC} \int u_1 dt - \frac{1}{RC} \int u_2 dt \text{ mit } V \gg 1, \frac{1}{RC} \ll 1.$$

$$V=1, k \text{ " } : u_2 = \frac{1}{RC} \int u_1 dt - \frac{k-1}{RC} \int u_2 dt$$

$$= \frac{1}{RC} \int u_1 dt \text{ bei } k=1.$$

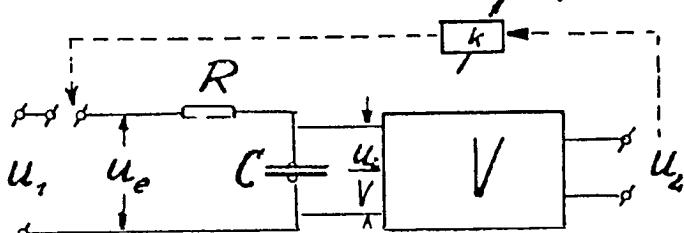
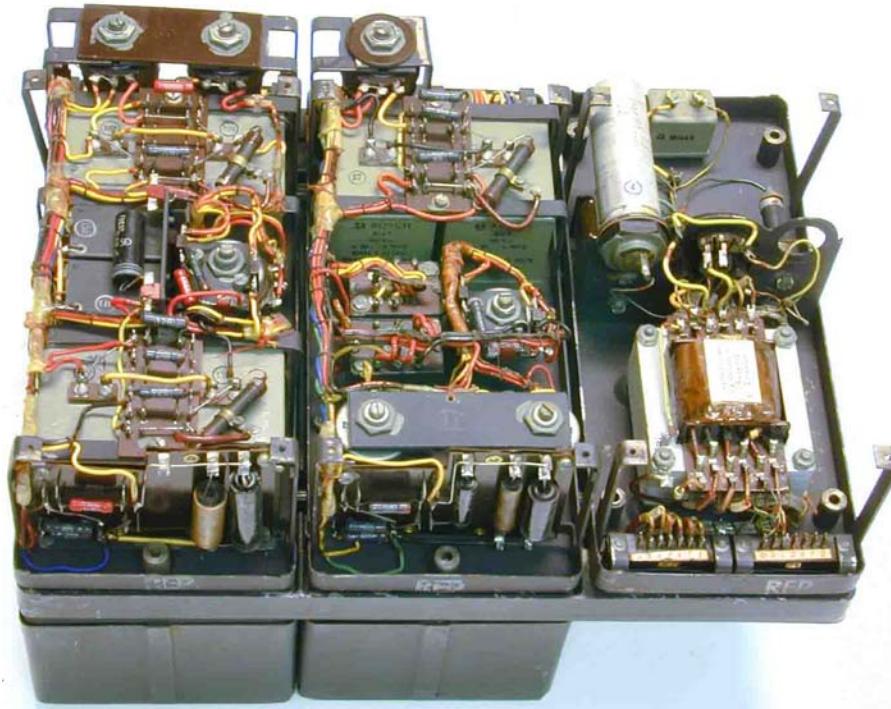
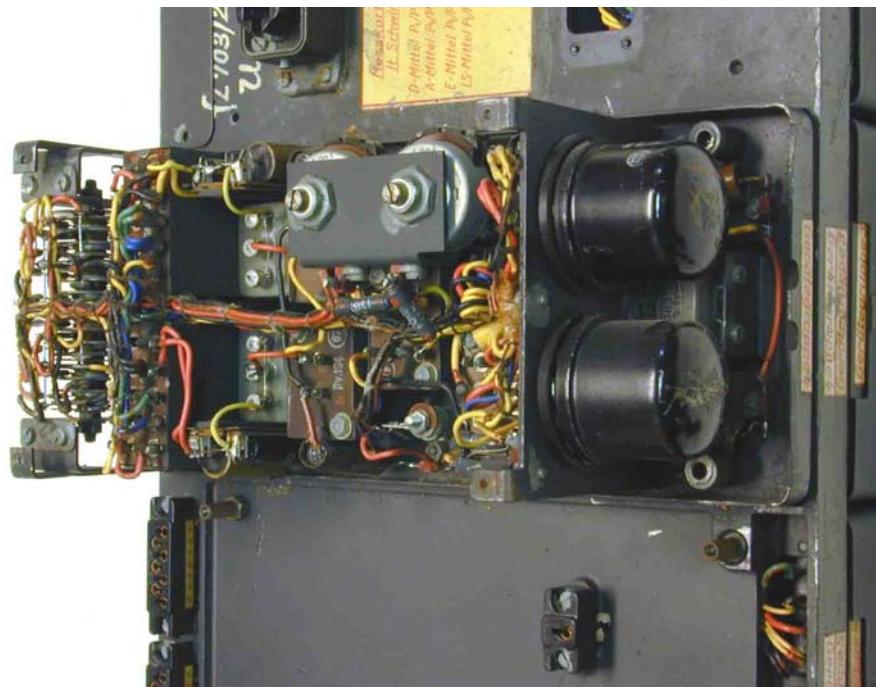


Abb. 2a & 2b. According to Reiner Sigmund, they actually did not employ integrators in the V2 steering circuit (only the radio guidance channel had one). And, the differentiator circuits did not employ feed-back (Rückkopplung), as gyro-signals were constantly changing anyway.



Some photographs of the „Mischgerät“ module (partly opened). The top photo fits good to the Abb. 1 & 2. (all photographs made by Adri de Keijzer). Interesting is, that all cables had PVC insulation. This device belongs to our collection, details @: archive displays and exhibits.

*Beide Bilder zeigen im Prinzip, wie ein solcher Integrator und Differentiator gebaut was. Im Diagramm für den Integrator sehen wir einen Kondensator, der von einem Gleichstrom, der dem zu integrierenden Meßwert proportional ist, aufgeladen wird. Verstärkt wurde dieser Messwert als Hüllkurve einer Wechselspannung mit unterdrücktem Träger. Man sieht hier, daß die Phase um 180 Grad springt, wenn der Meßwert sein Vorzeichen ändert. Bevor das*

Signal den Kondensator als Strom auflädt, wurde, wurde es in einer Phasenbrücke gleichgerichtet. Das Gegenteil findet nach der Integration im Kondensator; die Gleichspannung wird nun vor weiterer Verstärkung wieder aufmoduliert. Man sieht hier auch die Rückkopplung. Im Differentiator sind Widerstand und Kondensator vertauscht. Der Widerstand ist hier sehr klein, und nur nötig weil die Elektronenröhre ja nur Spannung verstärken kann.

Nun wollen wir uns einem anderen Problem zuwenden. Die Rakete hatte schon einen "Autopiloten" in Entwicklung, eine Kreiselkurssteuerung. Dieses System zusammen mit dem Fernsteuerungssystem mußte getestet werden, bevor man einen freien Flug riskieren konnte. Dies geschah wie folgt:

Die etwa 14 m hohe Rakete, einschließlich des ganzen Kurssteuerungssystems, wurde in einem Prüfstand so aufgehängt, daß sie sich um den Schwerpunkt drehen konnte. Die Kurssteuerung bestand aus Kreiseln und zu dieser Zeit noch Wendezeigern (gefesselte Kreisel), Servomotoren, Strahlrudern und andere Teilen. Der Motor wurde dann gezündet und die Rakete von der vertikalen Lage ausgelenkt und losgelassen. Sie sollte in die vertikale Lage aperiodisch, ohne Überschwingung zurückgehen. Diese aufwendige und unbequeme Methode wurde jedoch bald zum größten Teil ersetzt durch einen mechanischen Simulator, welcher in der Hauptachse aus einem Pendel bestand welches mit Wirbelstrombremse, Potentiometer Abgriff und einem Drehmomentgeber ausgerüstet war. Das Pendel konnte aus der vertikalen Lage bis beinahe horizontal gekippt werden um die Dynamik der Rakete zu verschiedenen Flugzuständen zu simulieren. Diese Methode und die ganze Maschinerie stammte von Dr. Walther Häusermann.

Ungefähr zur selben Zeit konstruierte Josef Böhm einen Schwingtisch, der die Scharnierder Strahlruder zu simulieren und die Montage der Kreisel ermöglichte. Diese elektro-mechanische Simulation war eine große Verbesserung verglichen mit der aufwendigen Prüfstand-Methode.

Dieser elektro-mechanische Simulator konnte natürlich nur die Rotation um den Schwerpunkt simulieren. Das Fernsteuersystem, welches die seitliche Bewegung des Schwerpunktes der Rakete als Input verwendet, konnte so natürlich nicht simuliert werden. Die mehr mechanisch veranlagten Entwickler der Rakete versuchten natürlich einen mechanischen Simulator für diesen Freiheitsgrad zu entwickeln, aber sie machten bald die Erfahrung, daß je langsamer und besser gedämpft die seitliche Bewegung der Rakete war, um so mehr unerwünschte Effekte wie mechanische Lose und Reibung an Einfluß gewannen. Und es mußte alles in Echtzeit arbeiten.

Nun, wenn es möglich ist, die Fernsteuerungsgleichung wie oben gezeigt - in elektronischer Hardware wie Differentiatoren und Integratoren auszudrücken, sollte es doch möglich sein die Bewegungsgleichungen auch so auszudrücken. Dies führte zu der Entwicklung eines elektronischen Simulators, welcher die verschiedenen Freiheitsgrade der Rakete nachbilden konnte und so die Erprobung des gesamten Kurs = und Fernsteuerungssystems im Laboratorium ermöglichte. Aber weder die Worte "Simulator" noch "Computer" waren üblich, sie wurden erst später erfunden. Wir nannten es "elektrische Modelle," oder "elektrische Analogien."

Ich will hier die elektrische Modellgeschichte einmal unterbrechen und später darauf zurück kommen, weil ich chronologisch einigermaßen genau bleiben möchte. Der Grund dafür war ein Besuch von Dr. von Braun's in unserem Labor. Er war ziemlich aufgeregt und erzählte mir, daß alle vier Firmen die unter Vertrag waren, eine Kurssteuerung zu entwickeln gestanden, daß ihre Berechnungen zeigten, daß die Steuerungen im Flug instabil sein würden.

Der Grund dafür sagte er, wäre bei allen vier, daß die Teile verwenden wollten, die ursprünglich für Flugzeuge gedacht waren, und daß einige, insbesondere die Servomotoren die die Strahlruder bewegen sollten, zu langsam waren. Letzten Endes hat die Rakete nur 60 Sekunden zum auskorrigieren einer Störung, während das Flugzeug den ganzen Tag hat (so zu sagen). Sie erklärten, daß sie entweder schnellere Servos haben müßten oder die Aufschaltung der Winkelbeschleunigung zusätzlich zu der Winkelgeschwindigkeit, welche von den Wendeziegern geliefert wurde. Alles dies brauchte erheblich mehr Zeit und Geld beides war nicht da.

Von Braun fragte mich: "Sie müssen doch ein ähnliches Problem in dem Fernsteuersystem haben; wie messen Sie denn die seitliche Geschwindigkeit?" Ich muß hier erwähnen, daß zu dieser Zeit die Entwicklung der Kurssteuerung von der Fernsteuerentwicklung organisch getrennt war. Ich sagte ihm, daß wir die seitliche Geschwindigkeit nicht messen, sondern automatisch ausrechnen. Er sagte "ausrechnen? Können Sie denn nicht dasselbe tun für die Winkelbeschleunigung? Und wie lange würde Sie brauchen?" Er dachte offensichtlich in Wochen oder Monate. Meine Antwort war: "Es ist jetzt 9 Uhr; wenn Sie mal um 6 Uhr heute Abend wieder hereinschauen würden ..." Er faßte das als guten Witz auf und ging wieder weg. Für uns aber war das alles dank unseres elektrischen Simulators kein Problem und wir fanden ohne tief in die Theorie gehen zu müssen, stabile Bereiche. Abends versuchten wir von Braun zu finden, aber vergebens. Mir fällt da ein, daß wir öfter die Heisenberg'schen Unbestimmtheits-Realisation auf von Braun anwandten: Auf von Braun bezogen, sagt

Relation No. 1                    Wenn man genau weiß wo er ist, kann man nie genau sagen was er als nächstes tut.

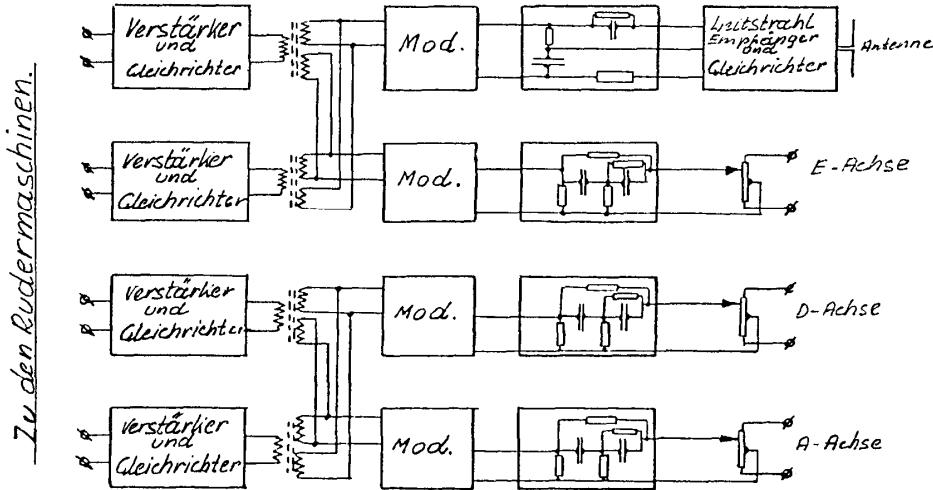
Relation No. 2:                    Wenn man genau weiß was er tut, kann ihn keiner finden.

Als er schließlich auftauchte und sah was wir getan hatten, erwarteten wir Lob. Aber alles was er sagte war: Dafür werdet ihr Kerle ja bezahlt. Wo sind denn die Wendezieger in diesem Aufbau?" Wir sagten ihm, daß zusätzlich zu der rechnerischen Gewinnung der Wendebeschleunigung die Wendezieger bei diesem Unternehmen auch gestorben seien und daß sie auch durch Computer-Teile ersetzt wären. Kosten: Ein paar Mark gegen ein paar tausend. Er sagte dann: "Oh gut! Ich brauche gerade mehr Geld für Antriebsleute" und verschwand. Er war ein großer Mensch, wir verehrten ihn alle.

Ich möchte hier erwähnen daß, da die Differentiatoren und Integratoren in dem endgültigen Design der Steuerung nur für Stabilisationszwecke da waren, sie keine positiven Rückkopplungen brauchten. Mit anderen Worten: Exakte Differentiation und Integration war in diesem Falle nicht notwendig.

Abbildung 3, (on the next page, AOB) zeigt das komplette Kurs = und Fernsteuerungssystem. Das Herz dieser Steuerung, der Computer, erhielt den Tarnnamen "Mischgerät," weil das Mischen der verschiedenen Signale dort auch stattfand. Es möge von Interesse sein, hier einmal die Steuerungsexperten jener Zeit zu beleuchten. Die deutsche Industrie reagierte heftig auf die Tatsache, daß ein paar grüne Jungen in Peenemünde, die noch nicht ganz trocken hinter den Ohren waren, mit einer ganz neuen Steuerungstechnologie herauskamen. Da war eine Konferenz hier in Berlin bei einer der größten Firmen (presumably Siemens & Halske, AOB). Was auf dieser Konferenz geschah, demonstrierte, wieviel manche Experten auf diesem Gebiet wirklich davon verstanden. Ich benutzte Nyquist's Stabilitätstheorem ausgiebig. Auf dieses Verfahren näher einzugehen ist im Rahmen dieses Vortrags nicht möglich.

Abb. 3 „Mischgerät.“



Ich möchte nur erwähnen daß, wenn bei Nyquist von Schwingung gesprochen wird, diese Schwingung nichts unmittelbar mit einer Schwingung zu tun hat, welche die Rakete im Flug ausübt oder nicht ausübt. Ich benutzte daher, abweichend von dem Sprachgebrauch der "klassischen Wurzel-Methode," das Wort "Phase" und "Phasenschieber." Einer der Herren der Firma fragte mich, ob ich wüßte, daß das Wort Phase nur Sinn mache, wenn es sich um eine Schwingung handelte. In anderen Worten, "wenn die Rakete keine Schwingung ausübt, kann ja Ihr System gar nicht funktionieren und die Schwingung wollen wir ja gerade vermeiden." Diejenigen von Ihnen, die sich einmal mit Regelungstechnik befaßt haben, werden jetzt anfangen zu lachen und ich tat das auch bis mir der Ernst der Lage klar wurde. Dies war nämlich für unseren General, der die Sitzung leitete, aber noch weniger davon verstand, so sehr überzeugend, daß er das neue System abdrehte. Die Computersteuerung war kaputt - tot - und die Industrie war beruhigt. Dies blieb so bis Prüfstand Tests zeigten, daß es das einzige System war, das wirklich funktionierte. Es wurde dann das endgültige System für die Rakete. Nicht nur, daß es billiger war, es war auch zuverlässiger und man konnte nun alle Geräte der Steuerung miteinander austauschen und miteinander arbeiten lassen. Z.B. Siemens Richtgeber mit Anschutz Rudermaschine oder stabilisierte Plattform von der Firma Kreiselgeräte mit irgend einer Rudermaschine von einer anderen Firma oder umgekehrt. Ich möchte noch erwähnen, daß auch die Stellungszuordnung der Rudermaschine überflüssig wurde. Wenn Ihnen also jemand ein Steuerungsschaltbild zeigt, welches Wendezieger enthält, dann war es **nicht** die V 2 Steuerung sondern der Vorschlag von einem, der es gerne verkauft hätte, wenn es funktioniert hätte.

Nun zurück zu dem Analog-Computer. Soweit war dieses Ding nur gut für die Simulation von Steuerungssystemen und Flugmechanik. Aber wir wollten mehr damit tun. Wir wollten Differentialgleichungen ganz gleich welcher Form oder Ordnung automatisch damit lösen. Dazu brauchten wir noch Geräte, die Multiplizieren, Addieren, Dividieren, Wurzelziehen (auch höhere Wurzeln) Funktionen von Funktionen bilden konnten. Nun wollen wir sehen, wie das gemacht wurde. Bevor ich aber darauf näher eingehe, will ich noch erwähnen, daß nicht ohne Beinbrüche abgeht. mein Chef kam ins Labor, sah das elektronische Drahtverhau und sagte nur: "Hoelzer, hören Sie doch endlich auf mit dieser elektrischen Spielerei und kümmern Sie sich um Ihre Aufgabe. Ab morgen ist das alles weg, verstanden?" Ich sagte, das einzige, was man in solcher Situation sagen konnte: "Jawohl, Herr Doktor." Am nächsten Morgen war alles weg und zwar war es jetzt in einem kleinen Raum ohne Fenster hinter

meinem Büro, durch welches der einzige Zutritt war, und den man abschließen konnte. Natürlich habe ich mich um meine Hauptaufgabe gekümmert. Aber mir schien es auch wichtig, ein Gerät zu schaffen, welches, wie man damals dachte in der Hauptsache für die Entwicklung von Raketensteuerungen von nicht zu überbietender Wichtigkeit war. Inzwischen haben sich nun ja auch noch ein paar andere Verwendungsmöglichkeiten für jede Sorte Computer ergeben. Als alles funktionierte, wurde mir dann vergeben. Dieses alles nut nebenbei.

Die Wechselstromverstärkermethode, die ich schon erwähnt habe, hatte andere Vorteile neben Stabilität. Da die Transformatoren sekundärseitig nicht belastet waren, konnte Addition und Subtraktion durch einfaches Verbinden der Sekundärseiten in Serie gemacht werden. Da heute keiner mehr mit Elektronenröhren arbeitet, lassen Sie mich erklären, daß sie sich ähnlich verhielten wie die heutigen MOS FET Transistoren, mit dem Gitter als Base. Daß die Rückkopplung in den Integratoren zu exakter Integration führt kann leicht in den Abbildungen 2a und 2b gesehen werden.

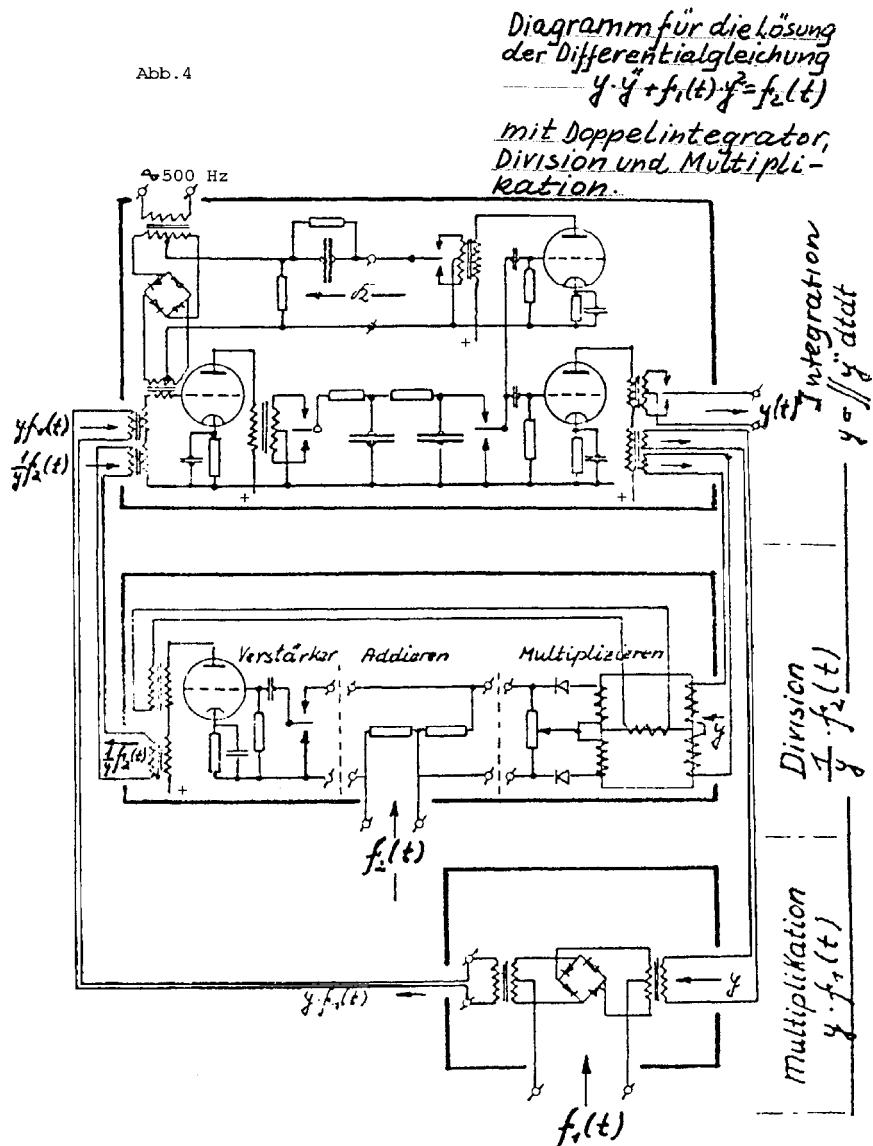


Abb. 4

Sogar Doppel-Differentiatoren und Doppelintegratoren wurden gebaut. Der letztere ist gezeigt in Abbildung 4 in einem Schaltbild. Das Rückkopplungsnetzwerk, welches die Verluste kompensiert und zu exakter Integration führt, ist in diesem Falle etwas komplizierter. Der

beweis dafür ist nicht schwer einzusehen. Sogar Integratoren, die überhaupt keine Impedanz in dem direkten Zweig der Schaltung haben, sondern alles in der Rückkopplung, waren möglich. So werden Integratoren heute gebaut. Die Idee, jedoch ist schon in meiner Dissertation dokumentiert die aus all diesem erwuchs (1946, Seite 20, Kapitel 11).

Dieser neue Integrator, der bald später in einer zweiten Generation des Wechselstrom-Analog-Computers verwendet wurde, wurde dann von den Herrn Dipl.-Ing. Hirschler und Dipl.-Ing. Hosenthien gebaut. Ein Prinzip Schaltbild zeigt Abbildung 5b.

Abb. 5a

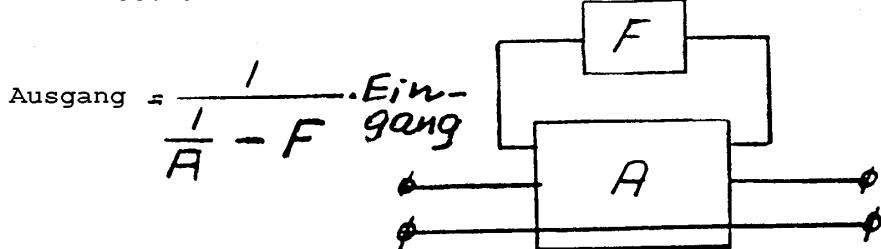
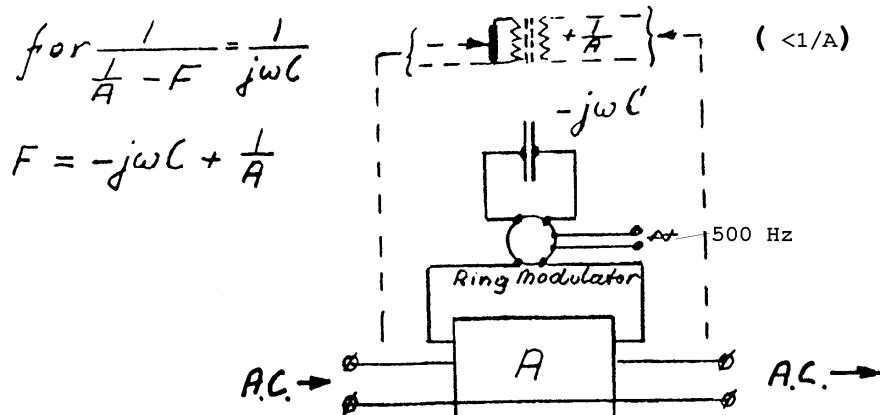


Abb. 5b



verbesserte Version  
des Integrators.

Abb. 5a &amp; 5b

Der Verstärker ist wieder Wechselstrom und die Verbindung zwischen Kondensator und Verstärker ist ein Ringmodulator. Der Kondensator glaubt nun, er sei mit einem Gleichstromverstärker verbunden. Wie die Gleichung in Abbildung 5 zeigt, ist die Rückkopplung hier negativ. Der Ausdruck  $1/v$  bedeutet jedoch eine positive Rückkopplung, die aber vernachlässigt werden kann, wenn  $v$  groß genug ist.

In 1950, etwa eine Dekade später, als der "Chopper stabilized Amplifier" von Goldberg erfunden wurde, wurde dann der heutige Gleichstrom Analog Computer Wirklichkeit.

Aber jetzt zurück nach 1940 mit ein paar Worten über Multiplikation, Division und Wurzelziehen.

Abb. 6a

Schaltschema zur Bildung des Ausdrucks  
 $y = a(t) \cdot b(t)$

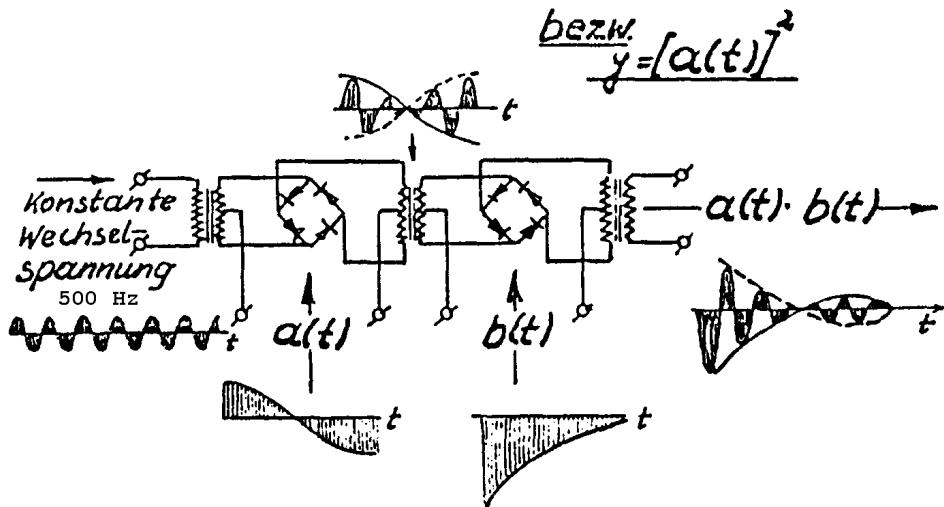


Abb. 6b

Multiplikation

$$\underline{y = a(t) \cdot b(t)}$$

resp.  
 $\underline{y = [a(t)]^2}$

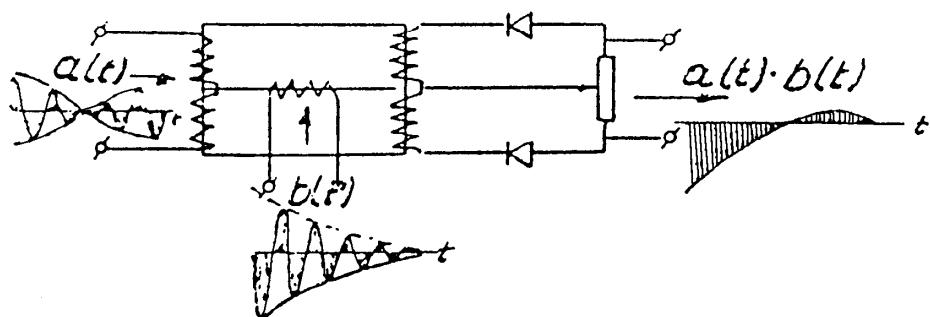


Abb. 6a &amp; 6b

Multiplikation und Quadrieren wurde mit Ringmodulatoren gemacht, wie Abbildung 6 zeigt. Das Multiplizieren zweier Funktionen miteinander ist dasselbe als die eine der anderen zu modulieren, daher die Verwendung von Ringmodulatoren. Abbildung 6a zeigt den Fall wo das Produkt als die Einhüllende einer Wechselspannung mit unterdrücktem Träger erscheint. man sieht den Phasensprung wenn die Polarität sich ändert. Abbildung 6b zeigt ein Schema wo  $a(t)$  und  $b(t)$  die Einhüllenden zweier Wechselspannungen sind und das Resultat sozusagen als "Gleichstrom" erscheint. Andere Anordnungen mit einem Faktor Wechsel- und dem anderen Gleichspannung sind auch möglich.

Abb. 7a

Schaltschema zur Bildung des Ausdrucks

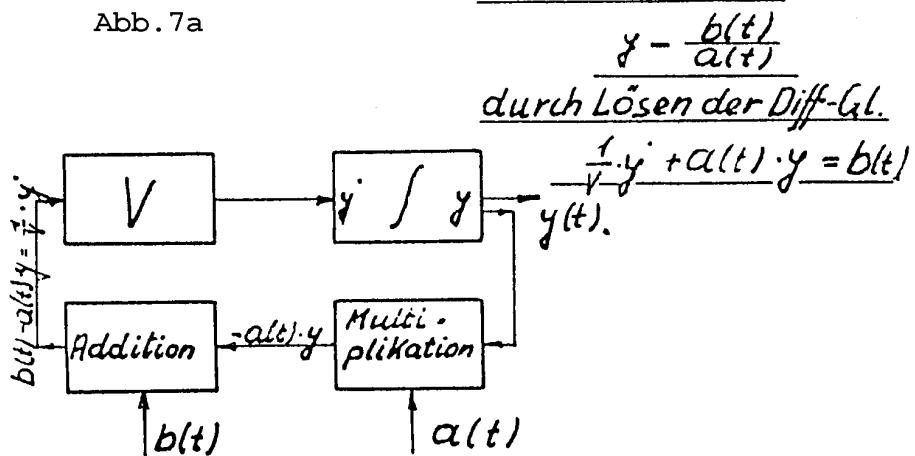
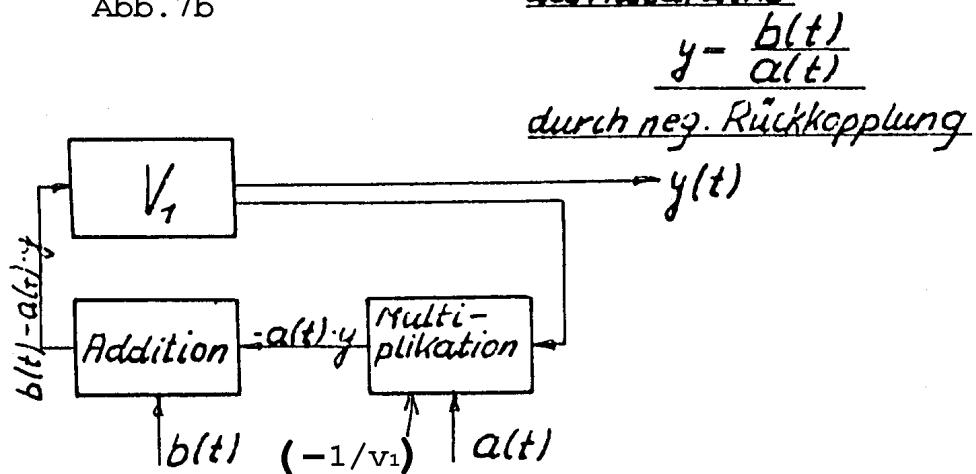


Abb. 7b

Schaltschema zur Bildung des Ausdrucks



$$b(t) - a(t) \cdot y = 1/a \cdot y ; \text{ gewünscht} := 0 !$$

$$b(t) - y(a(t) - 1/a) = 1/a \cdot y$$

$$\text{jetzt: } y = b(t)/a(t)$$

Abb. 7a &amp; 7b

Division (siehe Abbildung 7), basiert auf der Beobachtung, daß das partikuläre Integral der Differentialgleichung:

$$1/v \cdot \partial^l + ay = b \text{ ist } y = b/a \text{ (a = positiv)}$$

Die Formierung des Quotienten  $b/a$  ist aber verzögert durch den Ausgleichsvorgang welchen man jedoch beliebig kurz machen kann durch Vergrößerung von  $v$ . Wenn  $v$  groß ist, können  $a$  und  $b$  sogar langsam zeit veränderlich sein.

Ein sehr große Verstärkung erlaubt sogar ohne Integrator zu arbeiten, wobei ein statischer Fehler, da  $v$  letzten Endes nicht unendlich ist. Die Fehler kann jedoch wie folgt vermieden werden. Aus dem Abbildung 7b folgt die Gleichung:

$$y/v = b(t) - y \quad @ (t)$$

Unerwünscht ist aber  $0 = (t) - ya(t)$  wobei dann das exakte Resultat  $y = b(t)/a(t)$  wäre.

Dies kann man erreichen indem man die Konstante  $-1/v$  zu dem Faktor  $a(t)$  addiert welches dann das erwünschte Resultat

$$y = b(t)/a(t)$$

liefert.

Abb. 8

Division mittels selbst =  
abgleichender Brücke  
 $y = \frac{u_1(t)}{u_2(t)}$

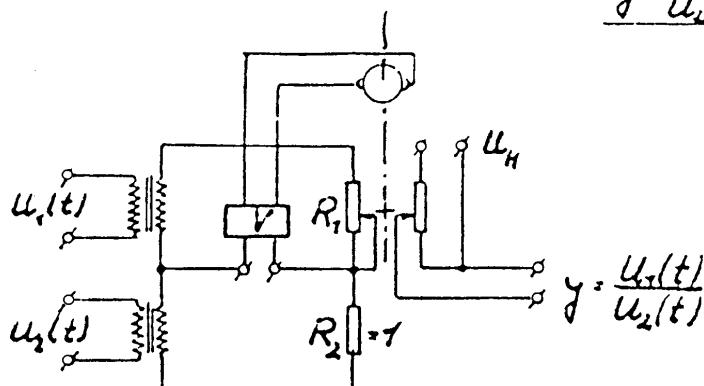


Abbildung 8

Eine Divisionsschaltung nach Abbildung 8 mit einer selbstabgleichenden Brücke scheiterte an der Nichterhältlichkeit eines Leichtankermotors.

Abb. 8a

Schaltschema zur Bil =  
dung des Ausdrucks  
durch Lösen der Diff.-Gl.  
 $y = \frac{1}{v} b(t)$   
 $\frac{1}{v} \cdot y + y^2 = b(t)$

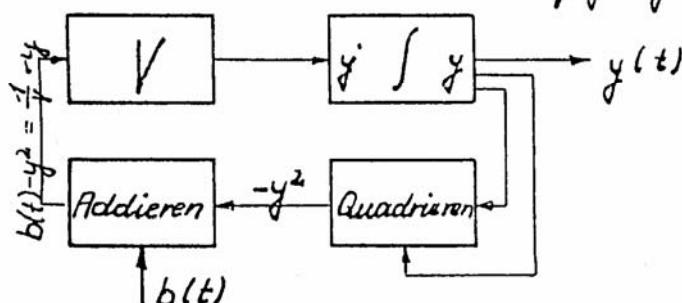


Abb. 8a

Abb. 9

Schema für die Lösung  
eines Systems von Diff.Gln.  
zweiter Ordnung

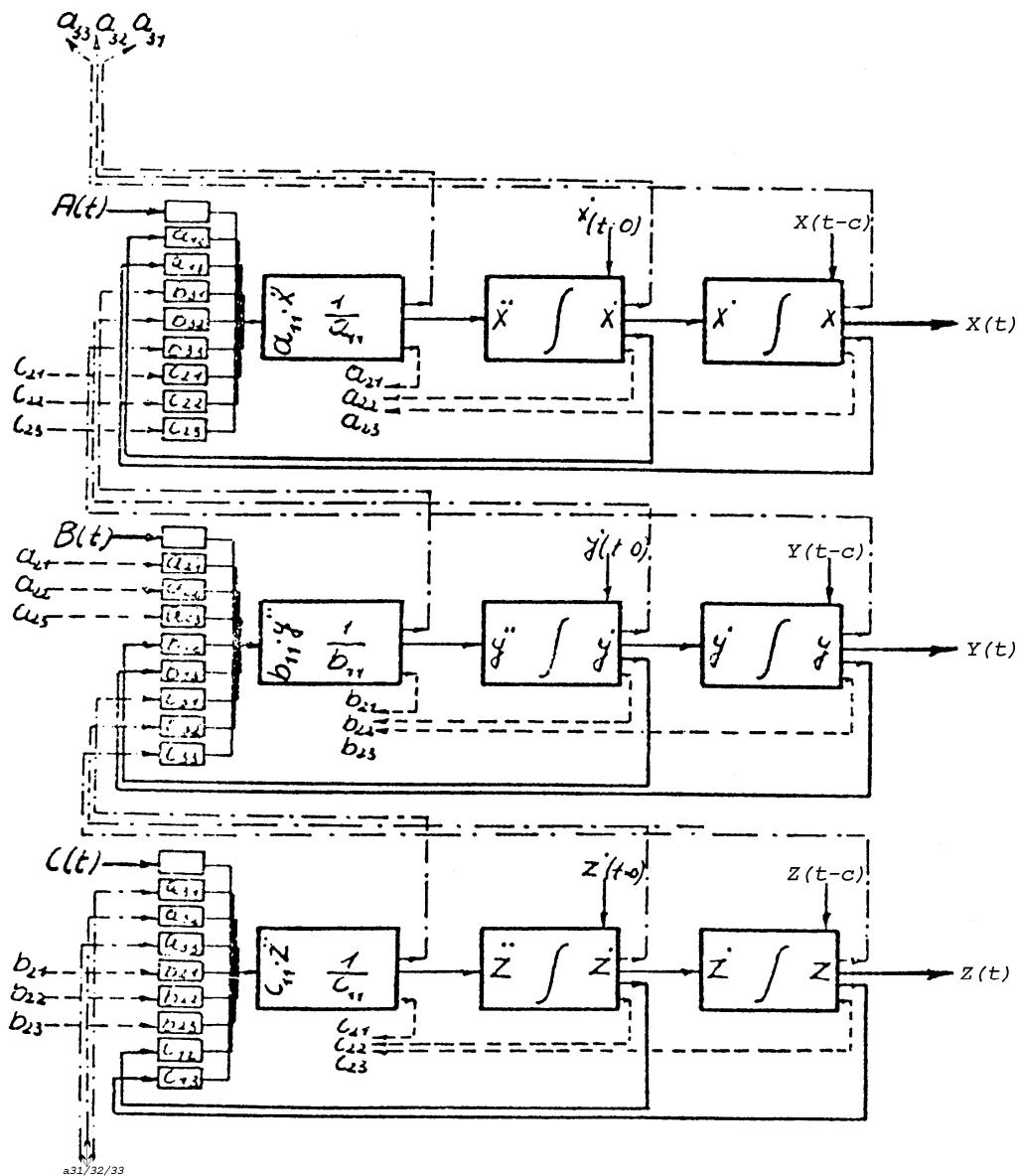


Abb. 9

Quadratwurzeln und höhere Wurzeln folgten im Prinzip der Divisionsschaltung (Abbildung 8a). Auch hier kann man fehlerfrei arbeiten durch Einführung von  $-1/v$ . Das Lösen von Systemen von Differentialgleichungen zeigt Abbildung 9 und braucht keine weitere Erklärung.

Systeme von algebraischen Gleichungen mit  $n$  Unbekannten wurden gelöst durch künstliche Einführung von Differentialquotienten der Unbekannten entlang der Hauptdiagonale der Matrix, also durch Transformation in ein System von linearen Differentialgleichungen der 1.

Ordnung. Man muß nur für die partikuläre Lösung nach Abklingen der Ausgleichsvorgänge warten um die Lösung zu haben. Wenn keine konstante partikuläre Lösung entsteht, würde das System auch mit anderen Lösungsmethoden nicht konvergieren.

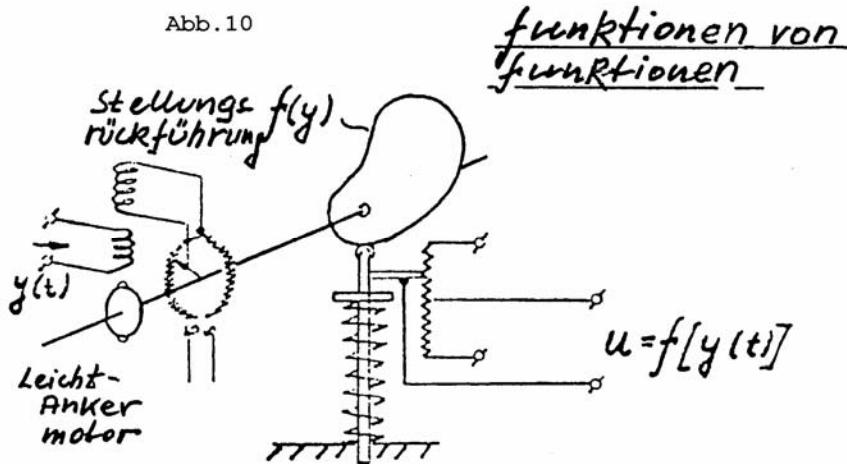


Abb. 10

Abbildung 10 zeigt eine Anordnung für Funktionen von Funktionen wobei ein Leichtankermotor mit Stellrückführung für die erste Funktion und eine Kurvenscheibe für die zweite verwendet wurde. Als ein letztes Beispiel von was im Jahre 1940 schon möglich war zeigt Abbildung 10a

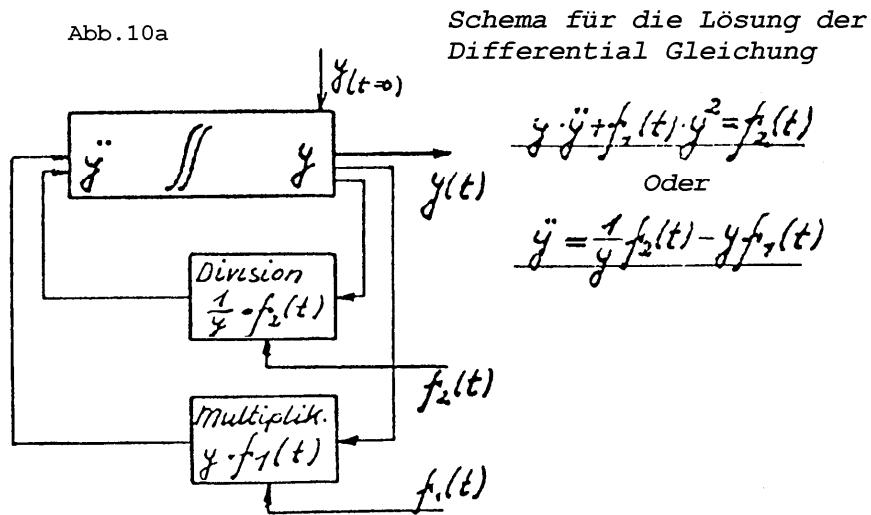


Abb. 10a

Es brauchte damals viele überzeugende Worte, daß so etwas wirklich geht. Die meisten Mathematiker betrachteten diese Behandlung ihrer Wissenschaft mit Stangen und Drähten als eine Beleidigung. Eine Generation von "Nicht Denken würde heranwachsen, usw." hatten diese Leute nun Recht oder Unrecht? Ich glaube die Antwort der neuen Generation, speziell hier in Berlin, ist einfach "Denkste."

Was ich nun bis jetzt beschrieben habe war, wie Differentialgleichungen im generellen gelöst werden könnten, wie Analog Technologie für die Steuerung verwendet wurde, und nun will ich zeigen wie das dynamische Verhalten der Rakete simuliert wurde. Eine Simulation des

kompletten Systems in zwei Freiheitsgraden der Raketen-Bewegung um den Schwerpunkt und die Bewegung des Schwerpunktes selbst im elektromagnetischen Feld der Fernsteuerung wird gezeigt im Abbildung 11.

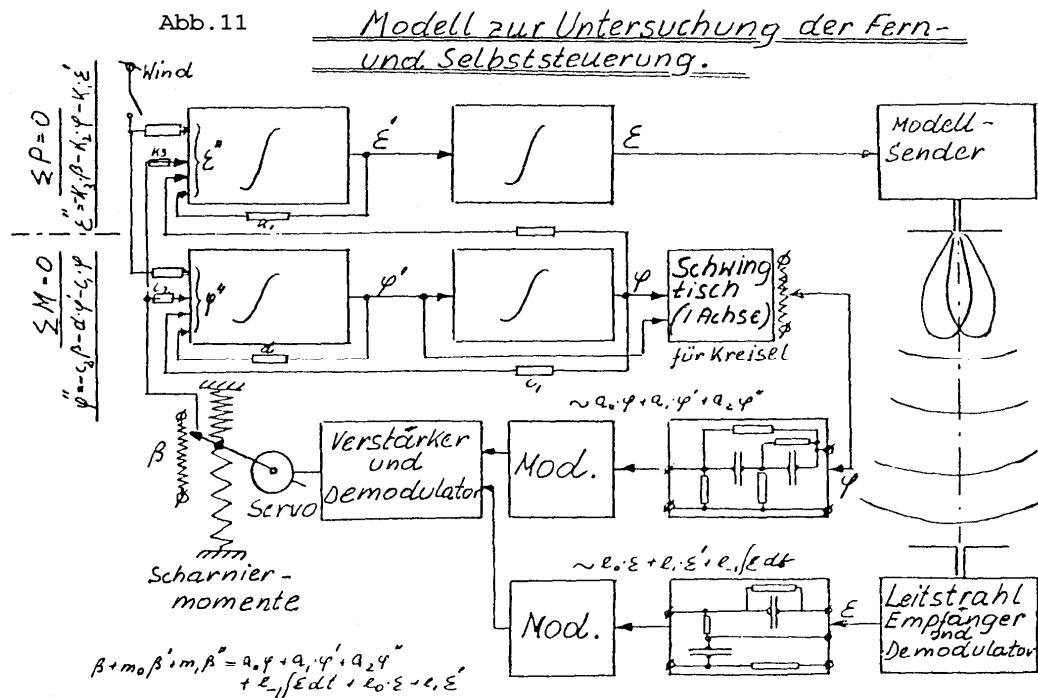


Abb. 11

Um den Lage-Kreisel selbst in dem Aufbau zu haben, war es nötig, einen Schwingtisch zu bauen, auf dem er montiert werden konnte. Dieser Schwingtisch wurde angetrieben von der Lagegeschwindigkeit; er führte die Integration zur Lage selbst durch, wurde aber von einem elektronischen Integrator überwacht, der parallel zu ihm arbeitete. Der original Fernsteuerungs-HF-Empfänger war auch in der Simulation eingeschlossen. Er empfing die Signale die von einem Simulator der Sendestation geliefert wurde.

Links im Abbildung 11 sieht man die original hydraulischen Servomotoren mit Federn belastet um die Scharniermomente der Strahlruder der Rakete zu simulieren. Diese Simulationsanlage wurde in mehrere Exemplare gebaut. Eine davon wurde den Amerikanern nach dem Krieg mit nach Amerika genommen und wurde in Redstone Arsenal, dem amerikanischen Peenemünde, etwa eine Dekade lang in betrieb gehalten und schließlich in verbesserten Form nachgebaut.

Während diese Entwicklung stattfand, dokumentierte ich alles genau, den ich wollte es als Doktor Dissertation an der Technischen Hochschule Darmstadt vorlegen. Aber das stellte sich nicht so einfach heraus. Zuerst wurde alles mit einem Geheimstempel versehen und eingeschlossen. Dann kam der Luftangriff auf Peenemünde in 1943 wo alles verbrannte, auch die völlig ausgearbeitete Dissertation.

Ungefähr Anfang 1945 hatte ich alles ein zweites Mal fertig, aber da war der Krieg zu Ende und die Amerikaner kassierten die Arbeit. Ich bekam sie aber nach mehreren Anläufen wieder und präsentierte sie in Darmstadt im selben Jahre. Aber nun gab es inzwischen eine Militärregierung und ein Captain der amerikanischen Armee war der technischen Hochschule vorgesetzt. Bei ihm mußte ich mir Genehmigung holen zum Promovieren. Er

blätterte die Dissertation durch, sagte daß Raketen und überhaupt Waffen nicht mehr gebraucht würden da dies der letzte Krieg gewesen sei. Deutschland sei zerstört, die anderen alle alliiert und solange er hier etwas zu sagen hätte - und das wäre noch sehr lange - würde hier nicht über Waffenentwicklung promoviert, - Pause-. als ich dann einwarf, daß Raketen ja auch für Raumfahrt gebraucht werden könnten sagte er in fließendem Deutsch: "Lieber Freund, Sie haben vielleicht eine blühende Fantasie!" und draußen war ich. mein Doktorvater, Professor Walther, kam dann auf die glorreiche Idee die Arbeit in zwei Teilen zu teilen; der erste teil nur über Analog Computer Entwicklung, die Anwendung auf die Raketenentwicklung in 2. Teil. Das war natürlich eine Mordsarbeit und im Februar des nächsten Jahres war es dann so weit. Gezeigt bekam der Herr Kapitän nur den ersten teil. Von da an spielte der Computer, zuerst der Analog Computer, später dann auch der Digital Computer, eine sehr wichtige Rolle in der Raketenentwicklung sowohl für militärische Zwecke als auf für die Raumfahrt.

Ich möchte zum Schluß noch folgendes erwähnen:

Die Peenemünder Raketeentwicklung brauchte viele hundert Flüge um zu einer zuverlässigen Konstruktion zu gelangen trotz der Tatsache, daß die Rakete, verglichen mit dem was wir heute in der Raumfahrt haben, doch sehr einfach war. Die sehr komplizierte, vielstufige Saturn V Mondrakete hatte hingegen keinen einzigen Versager des Control und Navigations Systems. Noch nicht einmal von der eingebauten Redundanz wurde Gebrauch gemacht. Für alle diese Erfolge ist eine Erfindung verantwortlich, die wie ich glaube, die einzige Erfindung ist, die mehr Probleme gelöst hat, als die sie selbst schuf: Dies ist der Computer.

Finish

Abb. 12 Prinzipschaltbild der Dreiachsensteuerung

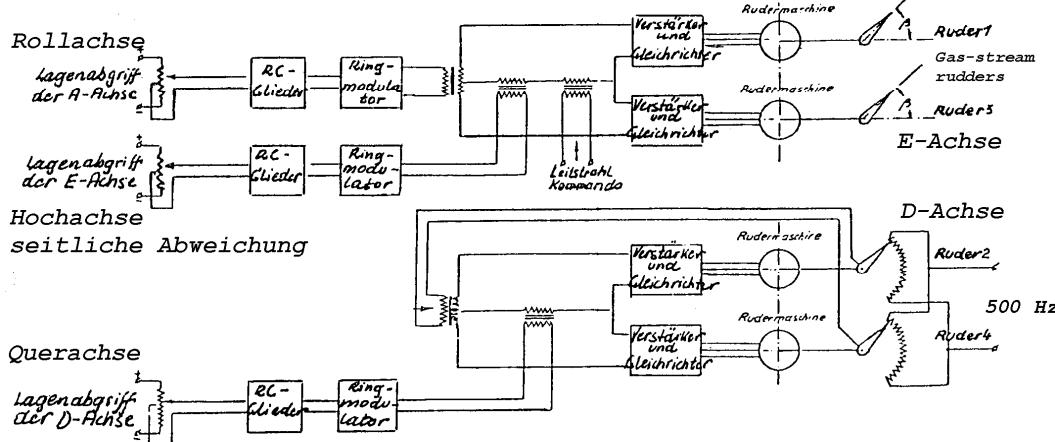


Abb. 12

This drawing was not used in Hoelzer's talk in Berlin though, it shows the principle of Hoelzer's system. On the left, we see the three inputs A, E, and D, originating from the "Dreiachskursteuerung" (three axis gyro platform). On the right-hand side we see the rudder system which "steers" the gas-stream, as to obtain the appropriate flight-path of a V2 (A4) rocket.